

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-229238

(43) 公開日 平成10年(1998) 8月25日

(51) Int.Cl.⁶

H 0 1 S 3/10
3/07

識別記号

F I

H 0 1 S 3/10
3/07

Z

審査請求 未請求 請求項の数71 O L (全 34 頁)

(21) 出願番号 特願平9-341760

(22) 出願日 平成9年(1997)12月11日

(31) 優先権主張番号 特願平8-331199

(32) 優先日 平8(1996)12月11日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平8-333923

(32) 優先日 平8(1996)12月13日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72) 発明者 山田 誠

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72) 発明者 小野 浩孝

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(72) 発明者 金森 照寿

東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内

(74) 代理人 弁理士 谷 義一 (外1名)

最終頁に続く

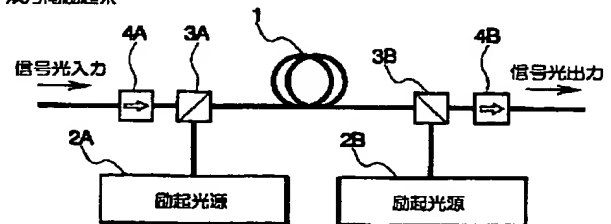
(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器および光増幅方法

(57) 【要約】

【課題】 平坦で広帯域な増幅特性を有する1.58 μ m光ファイバ増幅器およびこれを用いた光増幅方法を提供すること。

【解決手段】 光増幅器は、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバ1と、前記光ファイバを励起する励起光源2A、2Bと、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Er添加ファイバに入射する光学手段3A、3Bと、光アイソレータ4A、4Bとを備える。前記エルビウム添加ファイバは、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さである1.58 μ m帯光ファイバである。

双方向励起系



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記 E r 添加ファイバに入射する光学手段と、光アイソレータとを備えた光増幅器であって、前記エルビウム添加ファイバは、ファイバ長 (m) とエルビウム添加濃度 (重量 ppm) との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さである 1.58 μ m 帯光ファイバであることを特徴とする光増幅器。

【請求項 2】 前記実用基準値が 15 dB であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 3】 前記エルビウム添加ファイバは、E r 添加石英系ファイバ、E r 添加フッ化物系ファイバ、E r 添加テルライト系ガラスファイバ、E r 添加多成分酸化物系ガラスファイバ、E r 添加カルコゲナイド系ガラスファイバ、E r 添加フッリン酸ガラスファイバから選ばれることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 4】 前記エルビウム添加ファイバは E r 添加石英系ファイバ、E r 添加多成分酸化物系ガラスファイバ、E r 添加フッリン酸ガラスファイバ、E r 添加テルライト系ガラスファイバから選ばれ、1.570~1.600 μ m の波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が 1 dB 以下であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 5】 前記エルビウム添加ファイバは E r 添加フッ化物ファイバであり、1.565~1.600 μ m の波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が 1 dB 以下であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 6】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位または $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 7】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用いることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 8】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.98 μ m 帯励起光源または E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源であり、エルビウム添加ファイバとして、E r 添加石英系ファイバ、E r 添加多成分酸化物系ガラスファイバ、E r 添加フッリン酸ガラスファイバあるいは E r 添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする請求項 4 記載の光増幅器。

【請求項 9】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとして E r 添加石英系ファイバ、E r 添加多成分酸化物系ガラスファイバ、E r 添加フッリン酸ガラ

スファイバあるいは E r 添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 10】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.97 μ m 帯励起光源または E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源であり、エルビウム添加ファイバとして E r 添加フッ化物系ガラスファイバであることを特徴とする請求項 5 記載の光増幅器。

【請求項 11】 前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.97 μ m 帯励起光源と E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとして E r 添加フッ化物系ガラスファイバであることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 12】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 以上である E r 添加石英系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.98 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 13】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.6×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加石英系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 14】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.97 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 15】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.2×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 16】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.98 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 17】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{13/2}$ 準位を励起する 1.48 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記載の光増幅器。

【請求項 18】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量 ppm) 以上である E r 添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源は E r の $4I_{11/2}$ 準位を励起する 0.98 μ m 帯励起光源であることを特徴とする請求項 1 記

載の光増幅器。

【請求項19】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加多成分酸化ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項20】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項21】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.02×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項22】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項23】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項24】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項25】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項26】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.4

8 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項27】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加酸化多成分ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項28】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項29】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項1記載の光増幅器。

【請求項30】 信号光を複数の波長帯域に分波する分波部と、

前記分波部から出力される各波長帯域の信号光をそれぞれ増幅する複数の光増幅部と、

前記複数の光増幅部から出力される各信号光を合波する合波部とを備えた光増幅器であって、

前記光増幅部の少なくとも1つは、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Er添加ファイバに入射する光学手段と、光アイソレータとを、前記エルビウム添加ファイバは、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さである1.58 μ m帯光ファイバであることを特徴とする光増幅器。

【請求項31】 前記実用基準値が15dBであることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項32】 前記エルビウム添加ファイバは、Er添加石英系ファイバ、Er添加フッ化物系ファイバ、Er添加テルライト系ガラスファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加カルコゲナイド系ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバから選ばれることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項33】 前記エルビウム添加ファイバはEr添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスフ

イバまたはEr添加フツリン酸ガラスファイバから1・570～1・600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項34】 前記エルビウム添加ファイバはEr添加フツ化物ファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであり、1・565～1・600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項35】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位または $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項36】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項37】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項38】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源の両方を用い、エルビウム添加ファイバとして、Er添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項39】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・97 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項40】 前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・97 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとしてEr添加フツ化物系ガラスファイバであることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項41】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・3 $\times 10^5$ 以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・97 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項42】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・6 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項43】 前記エルビウム添加ファイバは等価的

ファイバ長が0・1 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加フツ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・97 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項44】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・2 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加フツ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する0・97 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項45】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・005 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項46】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・01 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項47】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・008 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項48】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・015 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項49】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・01 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項50】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・02 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1・48 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項51】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が0・008 $\times 10^5$ (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0・98 μ m帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載

の光増幅器。

【請求項52】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項53】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項54】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.97 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項55】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項56】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加酸化物多成分ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項57】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項58】 前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項59】 前記光増幅部として、少なくとも、コ

ア部またはクラッド部の一方にツリウム(Tm)を添加したツリウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Tm添加ファイバに入射する光学手段とからなるTm添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項60】 前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にプラセオジム(Pr)を添加したプラセオジム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Pr添加ファイバに入射する光学手段とからなるPr添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項61】 前記光増幅部として、少なくとも、ラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項62】 前記光増幅部として、少なくとも、 $1.51 \mu\text{m}$ 帯で増幅作用を有するラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項30記載の光増幅器。

【請求項63】 前記複数の光増幅部と合波部の入力ポートとの間に、各光増幅部から出力される信号光強度を調整する光可変減衰器が挿入されていることを特徴とする請求項30、59、60、62のいずれかに記載の光増幅器。

【請求項64】 コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバに、励起光源からの励起光を通して励起して $1.58 \mu\text{m}$ 帯の波長域にある信号光を増幅する光増幅方法であって、

前記エルビウム添加光ファイバとして、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さのものをを用いることを特徴とする光増幅方法。

【請求項65】 前記 $1.58 \mu\text{m}$ 帯の波長域にある複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差を1dB以下とすることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項66】 前記 $1.58 \mu\text{m}$ 帯の波長域が $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域であることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項67】 前記 $1.58 \mu\text{m}$ 帯の波長域が $1.565 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域であることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項68】 前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にツリウム(Tm)を添加したツリウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前

記Tm添加ファイバに入射する光学手段とからなるTm添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項69】 前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にプラセオジウム(Pr)を添加したプラセオジウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Pr添加ファイバに入射する光学手段とからなるPr添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項70】 前記光増幅部として、少なくとも、ラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【請求項71】 前記光増幅部として、少なくとも、1.51 μ m帯で増幅作用を有するラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする請求項64記載の光増幅方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は光信号を増幅する光増幅器および光増幅方法に関し、さらに詳しくは、1.570~1.600 μ mまたは1.565~1.600 μ m波長域にある信号光を増幅する1.58 μ m帯光ファイバ増幅器およびこれを用いた広帯域な光増幅方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 Er添加光ファイバ増幅器(EDFA)は、通信用光ファイバの伝送損失が最小となる1.55 μ m帯での光増幅が可能であり、偏波依存性がなく、通信用光ファイバと低損失で接続できる等の特徴をもっている。そのため、1.55 μ m帯光通信システムにおける光増幅器として開発がすすめられており、例えば、デジタル信号を伝送する幹線伝送系やアナログ信号を伝送する光CATV等に幅広く適用されている。

【0003】 近年、1.55 μ m帯光通信システムでは、さらに通信容量の増加を目指し、信号波長の異なる複数の信号光からなる波長多重(WDM)信号の伝送が試みられている。このため、光ファイバ増幅器には、広い増幅帯域を有するとともに、WDM信号における波長の異なる各信号光を利得偏差なく増幅する特性が要求されている。

【0004】 この要求に応える従来技術として、(1) Alを共添加したEr添加石英系ファイバを増幅媒体に用いる、(2) 光増幅器の後段に波長等化器を付加する、(3) Er添加フッ化物系ファイバを増幅媒体に用いる

(4) 利得スペクトルの異なる2つのEr添加光ファイバをカスケード接続するなどの方法が提案されてきた。

【0005】 (1)では、1.54~1.56 μ mのWDM信号の利得偏差を0.2以下にできることが報告さ

れている(S. Yoshida, et al., "Gain-flattened FDFA with high Al concentration for multistage repeatered WDM transmission systems", Electron. Lett., vol. 31, p. 1765-1767, 1995)。(2)および(3)では、1.532~1.56 μ mのWDM信号の利得偏差を1.5dB以下にできることが報告されている(R. Kashyap, et al., "Wideband gain flattened erbium fiber amplifier using a photosensitive fiber blazed grating", Electron. Lett., vol. 29, pp. 154-156, 1993 および M. Yamada, et al., "Fluoride-based erbium-doped fiber amplifier with inherently flat gain spectrum", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 8, pp. 882-884, 1996)。さらに、(4)では、Al共添加Er添加石英系ファイバとP共添加Er添加石英系ファイバをカスケード接続することにより、1.54~1.56 μ mのWDM信号の利得偏差を1.3dB以下(T. Kashiwada et al., "Gain flattening for fiber amplifiers", OFC'95, paper TuP1, 1995)に、Al共添加Er添加石英系ファイバとP共添加Er添加石英系ファイバをカスケード接続することにより、1.54~1.56 μ mのWDM信号の利得偏差を1.3dB以下(T. Kashiwada et al., "A low-noise and gain-flattened amplifier composed of a silica-based and a fluoride-based Er³⁺-doped fiber amplifier in a cascade configuration", OFC'95, paper TuP1, 1995)に、また、Al共添加Er添加石英系ファイバとP共添加Er添加石英系ファイバをカスケード接続することにより、1.53~1.56 μ mのWDM信号の利得偏差を1.1dB以下(M. Yamada et al., "Gain flattening for fiber amplifiers", IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 8, pp. 620-622, 1996)にできることが報告されている。

【0006】 現在、(2)、(3)および(4)の光ファイバ増幅器を用いた1Tbit/s、2.6Tbit/s等のWDM伝送実験が報告されている。しかし、上記の方法を用いても、平坦な増幅特性を示す帯域は図1に示すように、約1530nmから1560nmに限られており(山田 他、電子情報通信学会技術報告、LQE96-27, p. 43-48) WDM伝送で使用する通信帯域をより一層広げるためには、光ファイバ増幅器の帯域特性改善(広帯域化および利得平坦化)が不可欠である。

【0007】 一方、Er添加石英系ファイバは、1.53~1.56 μ m(1.55 μ m帯)の増幅帯域の他に、1.57~1.61 μ m(1.58 μ m帯)の増幅帯域を有することが報告されている。J. F. Massicott et al., "High gain, broadband, 1.6 μ m Er³⁺ doped silica fiber amplifier", Electron. Lett., vol. 26, pp. 1645-1646, 1990および、J. F. Massicott et al., "Low noise operation of Er³⁺ doped silica fiber amplifier around 1.6 μ m", Electron. Lett., vol. 28, pp. 1924-1925, 1992)。図2は、この報告(J. F. Massicott et al., "High gain, broadband, 1.6 μ m Er³⁺-doped silica fiber amplifie

r", Electron. Lett., vol. 26, pp. 1645-1646, 1990) にある1.58 μ m帯増幅帯域を示す。図2において実験はファイバ長 $L=200$ m、破線は $L=175$ m、一点鎖線は $L=150$ mの場合の信号利得曲線を示す。

【0008】上記論文で紹介されている従来の1.58 μ m帯光ファイバ増幅器では、次のような問題点がある。

【0009】1) 従来のEr添加光ファイバ増幅器の励起光源として使用される0.98 μ m帯(Er添加石英系ファイバのErの $4I_{11/2}$ 準位励起)、0.97 μ m帯(Er添加フッ化物系ファイバのErの $4I_{11/2}$ 準位励起)、または1.48 μ m帯(各ファイバのErの $4I_{13/2}$ 準位励起)のものと異なり、高出力の1.55 μ m帯の励起光源が必要となり、高価なものとなる。

【0010】2) 1.58 μ m帯の増幅帯域を実現するためのEr添加光ファイバのファイバ長その他に関する明確な設計法が明らかになっていない。

【0011】3) 1.58 μ m帯におけるWDM信号の各信号波長の利得を均一にする(利得偏差を小さくする)ことができない。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】したがって、本発明の目的は、1.58 μ m光ファイバ増幅器およびこれを用いた光増幅方法を提供することである。

【0013】本発明の別の目的は、平坦で広帯域な増幅特性を有する光増幅器およびこれを用いた光増幅方法を提供することである。

【0014】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、第1の発明は、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Er添加ファイバに入射する光学手段と、光アイソレータとを備えた光増幅器であって、前記エルビウム添加ファイバは、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さである1.58 μ m帯光ファイバであることを特徴とする。

【0015】第2の発明は、前記実用基準値が15dBであることを特徴とする。

【0016】第3の発明は、前記エルビウム添加ファイバは、Er添加石英系ファイバ、Er添加フッ化物系ファイバ、Er添加テルライト系ガラスファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加カルコゲナイド系ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバから選ばれることを特徴とする。

【0017】第4の発明は、前記エルビウム添加ファイバはEr添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系

ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバ、Er添加テルライト系ガラスファイバから選ばれ、1.570~1.600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする。

【0018】第5の発明は、前記エルビウム添加ファイバはEr添加フッ化物ファイバであり、1.565~1.600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする。

【0019】第6の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位または $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源であることを特徴とする。

【0020】第7の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用いることを特徴とする。

【0021】第8の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であり、エルビウム添加ファイバとして、Er添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0022】第9の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとしてEr添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加フツリン酸ガラスファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0023】第10の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であり、エルビウム添加ファイバとしてEr添加フッ化物系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0024】第11の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとしてEr添加フッ化物系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0025】第12の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0026】第13の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.6×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0027】第14の発明は、前記エルビウム添加フ

イバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.97 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0028】第15の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.2×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0029】第16の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0030】第17の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0031】第18の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0032】第19の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0033】第20の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0034】第21の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.02×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0035】第22の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加フッリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0036】第23の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重

量ppm) 以上であるEr添加フッリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0037】第24の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0038】第25の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.97 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0039】第26の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0040】第27の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加酸化物多成分ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0041】第28の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0042】第29の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm) 以上であるEr添加フッリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98 \mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48 \mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0043】第30の発明は、信号光を複数の波長帯域に分波する分波部と、前記分波部から出力される各波長帯域の信号光をそれぞれ増幅する複数の光増幅部と、前記複数の光増幅部から出力される各信号光を合波する合波部とを備えた光増幅器であって、前記光増幅部の少なくとも1つは、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバと、

前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Er添加ファイバに入射する光学手段と、光アイソレータとを、前記エルビウム添加ファイバは、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の实用基準値以上の信号利得となる長さである1.58 μ m帯光ファイバであることを特徴とする。

【0044】第31の発明は、前記实用基準値が15dBであることを特徴とする。

【0045】第32の発明は、前記エルビウム添加ファイバは、Er添加石英系ファイバ、Er添加フッ化物系ファイバ、Er添加テルライト系ガラスファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加カルコゲナイド系ガラスファイバ、Er添加ツツリン酸ガラスファイバから選ばれることを特徴とする。

【0046】第33の発明は、前記エルビウム添加ファイバはEr添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバまたはEr添加ツツリン酸ガラスファイバから1.570~1.600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする。

【0047】第34の発明は、前記エルビウム添加ファイバはEr添加フッ化物ファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであり、1.565~1.600 μ mの波長域にある異なる複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差が1dB以下であることを特徴とする。

【0048】第35の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位または $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源であることを特徴とする。

【0049】第36の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位と $4I_{13/2}$ 準位を励起する光源の両者を用いることを特徴とする。

【0050】第37の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0051】第38の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両方を用い、エルビウム添加ファイバとして、Er添加石英系ファイバ、Er添加多成分酸化物系ガラスファイバ、Er添加ツツリン酸ガラスファイバあるいはEr添加テルライト系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0052】第39の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源またはErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源で

あることを特徴とする。

【0053】第40の発明は、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源の両者を用い、エルビウム添加ファイバとしてEr添加フッ化物系ガラスファイバであることを特徴とする。

【0054】第41の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0055】第42の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.6×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0056】第43の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0057】第44の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.2×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する0.97 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0058】第45の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0059】第46の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0060】第47の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する0.98 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0061】第48の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加多成分酸化物ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する1.48 μ m帯励起光源であることを特徴とする。

【0062】第49の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量

ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0063】第50の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.02×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0064】第51の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0065】第52の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.015×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源であることを特徴とする。

【0066】第53の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.3×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加石英系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0067】第54の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.1×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フッ化物系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.97\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0068】第55の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.005×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加テルライトガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0069】第56の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加酸化物多成分ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0070】第57の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.01×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加カルコゲナイドガラス系フ

ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0071】第58の発明は、前記エルビウム添加ファイバは等価的ファイバ長が 0.008×10^5 (m・重量ppm)以上であるEr添加フツリン酸ガラス系ファイバであり、前記励起光源はErの $4I_{11/2}$ 準位を励起する $0.98\mu\text{m}$ 帯励起光源とErの $4I_{13/2}$ 準位を励起する $1.48\mu\text{m}$ 帯励起光源の両者を用いることを特徴とする。

【0072】第59の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にトリウム(Tm)を添加したトリウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Tm添加ファイバに入射する光学手段とからなるTm添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0073】第60の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にプラセオジム(Pr)を添加したプラセオジム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Pr添加ファイバに入射する光学手段とからなるPr添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0074】第61の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、ラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0075】第62の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、 $1.51\mu\text{m}$ 帯で増幅作用を有するラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0076】第63の発明は、前記複数の光増幅部と合波部の入力ポートとの間に、各光増幅部から出力される信号光強度を調整する光可変減衰器が挿入されていることを特徴とする。

【0077】第64の発明は、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバに、励起光源からの励起光を通して励起して $1.58\mu\text{m}$ 帯の波長域にある信号光を増幅する光ファイバ増幅方法であって、前記エルビウム添加光ファイバとして、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さのものを用いることを特徴とする。

【0078】第65の発明は、前記 $1.58\mu\text{m}$ 帯の波長域にある複数の信号光における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差を1dB以下とすることを特徴とする。

【0079】第66の発明は、前記 $1.58\mu\text{m}$ 帯の波長

域が $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域であることを特徴とする。

【0080】第67の発明は、前記 $1.58 \mu\text{m}$ の波長域が $1.565 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域であることを特徴とする。

【0081】第68の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にツリウム(Tm)を添加したツリウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Tm添加ファイバに入射する光学手段とからなるTm添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0082】第69の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、コア部またはクラッド部の一方にプラセオジム(Pr)を添加したプラセオジム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Pr添加ファイバに入射する光学手段とからなるPr添加光ファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0083】第70の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、ラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0084】第71の発明は、前記光増幅部として、少なくとも、 $1.51 \mu\text{m}$ 帯で増幅作用を有するラマンファイバ増幅器を用いることを特徴とする。

【0085】

【発明の実施の形態】図3～図5は、本発明の $1.58 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の基本構成を示す。

【0086】図3は前方励起系、図4は後方励起系、図5は双方向励起系の各構成を示す。増幅媒体であるEr添加光ファイバ1は、例えば、Er添加石英系ファイバ、Er添加フッ化物系ファイバ、Er添加テルライトガラス系ファイバ、Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバ、または、Er添加フッリン酸ガラス系ファイバを用いる。励起光源2A、2Bは、Er添加光ファイバ1へ入射する $0.98 \mu\text{m}$ 帯または $1.48 \mu\text{m}$ 帯(Er添加石英系ファイバ、Er添加テルライトガラス系ファイバ、Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバまたはEr添加フッリン酸ガラス系ファイバ、 $0.97 \mu\text{m}$ 帯または $1.48 \mu\text{m}$ 帯(Er添加フッ化物系ファイバ)の励起光を発生する。合波器3A、3Bは信号光と励起光を合波してEr添加光ファイバ1に入射する。光アイソレータ4A、4Bは、光ファイバ増幅器の発振を抑えるために配置される。

【0087】本発明の $1.58 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の特徴は、Er添加光ファイバ1のファイバ長とEr添加濃度の積を規定するところにある。以下、ファイバ長について説明する。

【0088】図6は、Er添加石英系ファイバの励起光強度に対する増幅帯域の変化の一例を示す。Er添加石英系ファイバのファイバ長は 20m 、比屈折率差は 1.8% 、カットオフ波長は $1.13 \mu\text{m}$ 、Al添加濃度は 40000wt. ppm 、Er添加濃度は 1000wt. ppm 、励起波長は $1.48 \mu\text{m}$ 帯、励起系は図3に示す前方励起系を用いた。なお、Er添加石英系ファイバのファイバ長 20m は、通常の $1.55 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器に用いられる長さである。

【0089】図6に示すように、励起光強度が $3 \sim 4\text{mW}$ 程度のときに $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域で利得が平坦になることが分かる。しかし、これらのファイバ長では、 $1.57 \sim 1.60 \mu\text{m}$ の波長域で実用的な信号利得(15dB 以上)が得られない。すなわち、通常の $1.55 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器に用いられるファイバ長では、実用的な $1.58 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器を構成することができない。

【0090】図7は、図3～図5の測定で用いた構成において、ファイバ長に対する増幅帯域の変化の一例を示す。なお、励起光強度は $1.58 \mu\text{m}$ 帯の波長域で利得が平坦になる値に設定した。図7に示すように、ファイバ長を長くすることにより、 $1.58 \mu\text{m}$ 帯の信号利得が増加することがわかる。すなわち、実用的な $1.58 \mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器を実現するためには、Er添加光ファイバ長が重要なパラメータになることがわかる。

【0091】ところで、Er添加光ファイバのファイバ長は、Er添加光ファイバのEr添加濃度に大きく依存する。このため、Er添加光ファイバの等価的なファイバ長を示すパラメータとして、Er添加光ファイバのファイバ長(m)とEr添加濃度(wt. ppm)の積を用いる。

【0092】図8、図9は、Er添加石英系ファイバで $1.58 \mu\text{m}$ 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示す。図8は $0.98 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合、図9は $1.48 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合である。

【0093】図10、図11は、Er添加フッ化物系ファイバで $1.58 \mu\text{m}$ 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示す。図10は $0.97 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合、図11は $1.48 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合である。

【0094】図12、図13はEr添加テルライトガラス系ファイバで $1.58 \mu\text{m}$ 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示す。図12は $0.98 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合、図13は $1.48 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合である。

【0095】図14、図15はEr添加酸化物多成分ガラス系ファイバで $1.58 \mu\text{m}$ 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示す。図14は $0.98 \mu\text{m}$ 帯の励起光を用いた場合、図15は

1. 48 μm 帯の励起光を用いた場合である。

【0096】図16、図17はEr添加カルコゲナイドガラス系ファイバで1.58 μm 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の関係を示す。図16は0.98 μm 帯の励起光を用いた場合、図17は1.48 μm 帯の励起光を用いた場合である。

【0097】図17、図18はEr添加フツリン酸ガラス系ファイバで1.58 μm 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の関係を示す。図17は0.98 μm 帯の励起光を用いた場合、図18は1.48 μm 帯の励起光を用いた場合である。

【0098】図19、図20はEr添加フツリン酸ガラス系ファイバで1.58 μm 帯が利得平坦時の信号利得と〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の関係を示す。図19は0.98 μm 帯の励起光を用いた場合、図20は1.48 μm 帯の励起光を用いた場合である。

【0099】実用的な1.58 μm 帯光ファイバ増幅器では、通常15 dB以上の信号利得が要求される。この信号利得を実現するには、各図に示す直線と信号利得15 dBの直線との交点によって求められる〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の値が、それ以上であればよい。すなわち、1.58 μm 帯光ファイバ増幅器において、信号利得15 dB以上を得るための〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕は、

Er添加石英系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.3 $\times 10^5$ 以上

Er添加石英系ファイバ、1.48 μm 帯励起の場合…
0.6 $\times 10^5$ 以上

Er添加フッ化物系ファイバ、0.97 μm 帯励起の場合…
0.1 $\times 10^5$ 以上

Er添加フッ化物系ファイバ、1.48 μm 帯励起の場合…
0.2 $\times 10^5$ 以上

Er添加テルライトガラス系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.005 $\times 10^5$ 以上

Er添加テルライトガラス系ファイバ、1.48 μm 帯励起の場合…
0.01 $\times 10^5$ 以上

Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.008 $\times 10^5$ 以上

Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.015 $\times 10^5$ 以上

Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.01 $\times 10^5$ 以上

Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、1.48 μm 帯励起の場合…
0.02 $\times 10^5$ 以上

Er添加フツリン酸ガラス系ファイバ、0.98 μm 帯励起の場合…
0.008 $\times 10^5$ 以上

Er添加フツリン酸ガラス系ファイバ、1.48 μm 帯励起の場合…
0.015 $\times 10^5$ 以上

となる。これらの関係は、本発明によって初めて明確にされたものである。

【0100】なお、信号利得と〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の関係は、ファイバパラメータ（比屈折率差、カットオフ波長）、Al添加濃度（Er添加石英系ファイバのみ）、コア／クラッド構造形成のためのドーパント（Er添加石英系ファイバのみ）、ガラス組成（Er添加フッ化物系ファイバのみ）、励起方法（前方励起、後方励起、双方向励起）等により若干変動する。したがって、励起方法やファイバパラメータ等によっては、信号利得15 dB以上を達成する〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕の最小値を上記の値以上に設定する必要がある。

【0101】また、図5に示す基本増幅率を用い、励起光源2Aとして0.98または0.97 μm 帯の励起光を発生する励起光源、励起光源2Bとして1.48 μm 帯の励起光を発生する励起光源を用いる場合、または、励起光源2Aとして1.48 μm 帯の励起光を発生する励起光源、励起光源2Bとして0.98または0.97 μm 帯の励起光を発生する励起光源を用いる場合では、0.98 μm 帯あるいは0.97 μm 帯励起光源が主の励起光源となり、1.48 μm 帯励起光源が副励起光源となる場合があるため、Er添加石英系ファイバ、Er添加フッ化物系ファイバ、Er添加テルライトガラス系ファイバ、Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバ、Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、Er添加フツリン酸ガラス系ファイバにおける1.58 μm 帯光ファイバ増幅器における信号利得15 dB以上を得るための〔ファイバ長 \times Er添加濃度〕は、各々のファイバにおける0.98 μm あるいは0.97 μm 帯励起の条件に準ずる。

【0102】図20は、Er添加石英系ファイバを用いた1.58 μm 帯光ファイバ増幅器における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得を示す。各信号波長は、1.570、1.574、1.578、1.582、1.586、1.594、1.600 μm である。ファイバ長は200m、比屈折率差は1.8%、カットオフ波長は1.13 μm 、Al添加濃度は40000 wt. ppm、Er添加濃度は1000 wt. ppm、励起波長は1.48 μm 帯、励起系は図5に示す双方向励起系を用いた。〔ファイバ長(m) \times Er添加濃度(wt. ppm)〕の値は2 $\times 10^5$ である。

【0103】図21は、Er添加フッ化物系ファイバを用いて構成した1.58 μm 帯光ファイバ増幅器における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得を示す。各信号波長は、1.565、1.570、1.575、1.580、1.585、1.590、1.595、1.600 μm である。ファイバ長は40m、比屈折率差が2.5%、カットオフ波長は1.0 μm 、Er添加濃度は1000 wt. ppm、励起波長は1.48 μm 帯、励起系は図5に示す双方向励起系を用いた。

〔ファイバ長(m) \times Er添加濃度(wt. ppm)〕の値は0.4 $\times 10^5$ である。

【0104】図20、図21に示すように、WDM信号の利得偏差（WDM信号の各信号利得における最大信号利得と最小信号利得の差）は、励起光強度を調整することにより小さくできることが分かる。また、いくつかのWDM信号の増幅実験により、WDM信号における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差 X （dB）と、WDM信号の利得偏差 Y （dB）との間には、

【0105】

【数1】

$$Y \approx X + 1 \quad \dots (1)$$

の関係があることが分かった。この関係は、Er添加テルライトガラス系ファイバ、Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバ、Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバ、Er添加フツリン酸ガラス系ファイバにおいても同様に成り立つ。

【0106】また、上記関係式（1）により、Er添加石英系ファイバまたはEr添加フツ化物系ファイバを用いた光ファイバ増幅器において、WDM信号の利得偏差 Y が2dB以内になるようにするには、WDM信号における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差 X が1dB以内になるように励起光強度を調整すればよいことが分かる。すなわち、1.58 μ m帯光ファイバ増幅器において、WDM信号における最大波長の信号利得と最小波長の信号利得の差を1dB以下で使用すれば、利得偏差が2dB以下となる実用的な1.58 μ m帯光ファイバ増幅器を実現することができる。なお、本使用方法は、Er添加石英系ファイバを用いた光ファイバ増幅器では1.57～1.60 μ mの波長域のWDM信号に対して適用でき、Er添加フツ化物系ファイバを用いた光ファイバ増幅器では1.565～1.600 μ mの波長域のWDM信号に対して適用でき、Er添加テルライトガラス系ファイバでは1.57～1.60 μ mの波長域のWDM信号に対して適用でき、Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバでは1.565～1.60 μ mの波長域のWDM信号に対して適用でき、Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバでは1.57～1.60 μ mの波長域のWDM信号に対して適用でき、Er添加フツリン酸ガラス系ファイバでは1.57～1.60 μ mの波長域のWDM信号に対して適用できる。

【0107】さらに、本発明に従い、信号光を複数の波長帯域に分波し、分波された各波長帯域の信号光を複数の光増幅部でそれぞれ増幅し、各光増幅部から出力される各信号光を合波して出力する構成にすると、複数の光増幅部は、それぞれ所定の増幅波長帯域を有しており、全体で増幅波長帯域の拡大を図ることができる。

【0108】例えば、増幅波長帯域 $\lambda a \sim \lambda b$ の第1の光増幅部と、増幅波長帯域 $\lambda c \sim \lambda d$ の第2の光増幅部を備えたとする（ $\lambda a < \lambda b < \lambda c < \lambda d$ ）。波長 $\lambda a \sim \lambda d$ の信号光は、分波部で波長 $\lambda a \sim \lambda b$ の信号光と波長 $\lambda c \sim \lambda d$ の信号光に分波される。波長 $\lambda a \sim \lambda b$

の信号光は第1の光増幅部で増幅され、波長 $\lambda c \sim \lambda d$ の信号光は第2の光増幅部で増幅され、増幅後の信号光強度を等しくするための光可変減衰器を通過させ、各信号光を合波部で合波する。これにより、広い波長帯域の信号光を一括して均一に増幅することができ、平坦で広帯域な増幅特性を有する光増幅器を実現できる。すなわち、第一の増幅部として、1.53～1.56 μ mの増幅波長域で利得平坦で動作する光ファイバ増幅器と第二の増幅部として、前記した1.565～1.56 μ mあるいは1.57～1.60 μ mの増幅波長域で利得平坦で動作する光ファイバ増幅器を組み合わせることにより1.53～1.60 μ m帯に利得帯域特性を有する光増幅器が実現できる。なお、光増幅部は3つ以上あっても同様であり、例えば、第一の増幅部として、1.43～1.49 μ mの増幅波長域で利得平坦で動作するTm³⁺添加光ファイバ増幅器と第二の増幅部として、1.49～1.52 μ mで利得平坦で動作するラマンファイバ増幅器と第三の増幅部として、1.53～1.56 μ mの増幅波長域で利得平坦で動作する光ファイバ増幅器と第四の増幅部として、前記した1.565～1.56 μ mあるいは1.57～1.56 μ mの増幅波長域で利得平坦で動作する光ファイバ増幅器を組み合わせることにより1.43～1.60 μ m帯に利得平坦特性を有する光増幅器が実現できる。

【0109】図22は、本発明の光増幅器の一つの実施形態を示す。

【0110】図において、本実施形態の光増幅器は、信号光を2つの波長帯域に分波する分波部11と、分波部11から出力される各波長帯域の信号光をそれぞれ増幅する2つの光増幅部10A、10Bと、各光増幅部から出力される信号光強度を調整する光可変減衰器（例えば、バルク型減衰量可変光アッテネータ）12A、12Bと、各光可変増幅器から出力される信号光を合波する合波部13とにより構成される。

【0111】図23は、光増幅部10A、10Bの構成例を示す。

【0112】図において、Er添加光ファイバ14は増幅媒体として用いられる。励起光源15A、15Bは、Er添加ファイバ5を励起する励起光を発生する。合波器16A、16Bは、信号光と励起光を合波してEr添加光ファイバ14に入射する。光アイソレータ17A、17Bは、光増幅部の発振を抑えるために配置される。なお、ここでは双方向励起の構成例を示すが、Er添加光ファイバ14の一方のみから励起光を入射する前方励起または後方励起の構成をとってもよい。

【0113】図24は、分波部11および合波部13の構成例を示す。

【0114】図23において、分波部11および合波部13は、信号光を2つの波長帯域に分波し、また2つの波長帯域の信号光を合波するために、それぞれ3つのア

レイ導波路回折格子18A, 18B, 18C, 18D, 18E, 18Fにより構成される。ここでは、信号光は16波多重とする。アレイ導波路回折格子18Aで一旦16波に分波され、さらにアレイ導波路回折格子18B, 18Cで8波ずつの群に合波されて光増幅部10A, 10Bに導かれる。また、光導波部10A, 10Bから出力された各信号光は、アレイ導波路回折格子18D, 18Eでそれぞれ一旦8波に分波され、合計16波の信号光がアレイ導波路回折格子18Fで合波されて出力される。また、分波部11および合波部13としては、図25に示す誘電体多層膜を用いたバルク型の合波器、ファイバカップラー等が適用できる。

【0115】図26は、本発明の光増幅器の増幅特性を測定する評価系の構成の一例を示す。

【0116】図26において、波長可変光源20A~20Pから出力される信号光は合波器21で合波され、信号光強度を調整する光アッテネータ22を介して本発明の光増幅器23に入力される。光増幅器23で増幅された信号光は、光スペクトラムアナライザ24で観測される。本図では、各々異なる16波の信号を合波する評価系を示したが、波長可変光源を追加することにより、波長数は幾らでも増加可能である。

【0117】図27は、本発明の光増幅器の別の実施形態を示す。

【0118】図27において、本実施形態の光増幅器は、信号光を8つの波長帯域に分波する分波部31と、分波部31から出力される各波長帯域の信号光をそれぞれ増幅する8つの光増幅部30A~30Hと、励起光を発生する励起光源32A, 32Bと、各励起光源から出力される励起光を分岐して各光増幅部に入力させる分岐器33A, 33Bと、各光増幅部から出力される信号光強度を調整する光可変減衰器34A~34Hと、各光可変減衰器から出力される信号光を合波する合波部35と、入力端および出力端に配置される光アイソレータ36A, 36Bにより構成される。

【0119】

【実施例】以下、本発明の実施例として、WDM信号の平均利得および利得偏差が実用レベルにある具体例を示す。ただし、これは例示であり、本発明の範囲を限定するものではない。

【0120】実施例1~21

信号光は、波長1.565~1.600 μ mの範囲で4~8波のWDM信号を用いた。励起光源には、発振波長が0.98 μ m, 0.97 μ m, 1.48 μ mの半導体レーザモジュールを用い、図3~図5に示す各励起系を用いた。WDM信号と励起光を合波する合波器には、励起光波長が0.98 μ m, 0.97 μ mの場合にはファイバ型カップラを用い、1.48 μ mの場合には誘電体多層膜により構成されたバルク型カップラを用いた。光アイソレータには、逆方向挿入損が60dBのものを用い

た。また、Er添加光ファイバは、次のものを用いた。

【0121】ファイバ1:

Er添加石英系ファイバ

比屈折率差1.8%, カットオフ波長1.13 μ m, Al添加濃度40000wt. ppm, Er添加濃度1000wt. ppm

ファイバ2:

Er添加石英系ファイバ

比屈折率差0.7%, カットオフ波長0.8 μ m, Al添加濃度10000wt. ppm, Er添加濃度2000wt. ppm

ファイバ3:

Er添加フッ化物系ファイバ

ガラス組成...Zr系フッ化物系ガラス (ZrF₄-HfF₄-BaF₂-PbF₂-LaF₃-YF₃-LiF-NaF)

比屈折率差2.5%, カットオフ波長1.0 μ m, Er添加濃度1000wt. ppm

ファイバ4:

Er添加フッ化物系ファイバ

ガラス組成...In系フッ化系ガラス (InF₃-GaF₃-ZnF₂-BaF₂-SrF₂-PbF₂-LaF₃-YF₃-LiF-NaF)

比屈折率差2.5%, カットオフ波長1.1 μ m, Er添加濃度500wt. ppm

ファイバ5:

Er添加フッ化物ファイバ

ガラス組成...GaF₃/InF₃系フッ化物ガラス (GaF₃-InF₃-ZnF₂-PbF₂-LaF₃-YF₃)

比屈折率差3.7%, カットオフ波長1.1 μ m, Er添加濃度500wt. ppm

ファイバ6:

Er添加アルミノ珪酸塩ガラスファイバ

比屈折率差0.7%, カットオフ波長1.1 μ m, Er添加濃度10000wt. ppm

ファイバ7:

Er添加リン酸塩ガラスファイバ

比屈折率差0.7%, カットオフ波長1.27 μ m, Er添加濃度10000wt. ppm

ファイバ8:

Er添加フツリン酸ガラスファイバ

比屈折率差0.29%, カットオフ波長1.0 μ m, Er添加濃度3300wt. ppm

ファイバ9:

Er添加テルライトガラスファイバ

比屈折率差2.5%, カットオフ波長1.3 μ m, Er添加濃度1000wt. ppm

ファイバ10:

Er添加カルコゲナイドガラスファイバ

比屈折率差3.7%、カットオフ波長1.1 μ m、Er
添加濃度2000wt. ppm

【0122】

【表1】

(Br 添加石英ファイバ)

	WDM信号波長 (μ m)	入射信号光 強度 (dBm/cm)	ファイバ 種類	ファイバ長 (m)	ファイバ径 \times Br 添加濃度 (μ m, ppm)	起振系	WDM信号 の平均増 (dB)	利得極差 (dB)
実施例1	1.570, 1.574, 1.578 1.582, 1.586, 1.590 1.594, 1.600	-35	ファイバ 1	200	2×10^3	1.48 μ m帯 (双方向起振)	31	1.8
実施例2	1.573, 1.582, 1.591 1.600	-30	ファイバ 1	100	1×10^3	1.48 μ m帯 (前方起振)	17	1.8
実施例3	1.570, 1.574, 1.578 1.582, 1.586, 1.590 1.594, 1.600	-35	ファイバ 2	100	2×10^3	1.48 μ m帯 (双方向起振)	28	1.6
実施例4	1.570, 1.576, 1.580 1.584, 1.588, 1.592 1.600	-20	ファイバ 1	100	1×10^3	0.98 μ m帯 (前方起振)	33	1.5

【0123】

【表2】

(Er 系知フ化糖系ファイバ)

	WDM信号波長 (μm)	入射信号光 強度 (dBm/ch)	ファイバ 種類	ファイバ長 (m)	ファイバ長(α) \times Er 励起濃度 (wt. ppm)	励起系	WDM信号 の平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
実施例 5	1.565, 1.570, 1.575 1.580, 1.585, 1.590 1.595, 1.600	-40	ファイバ 3	40	0.4×10^3	1.48 μm 帯 (双方向励起)	28	1.8
実施例 6	1.565, 1.570, 1.575 1.580, 1.585, 1.590 1.595, 1.600	-35	ファイバ 4	40	0.2×10^3	1.48 μm 帯 (双方向励起)	17	1.9
実施例 7	1.565, 1.570, 1.575 1.580, 1.585, 1.590 1.595, 1.600	-35	ファイバ 5	80	0.4×10^3	1.48 μm 帯 (双方向励起)	22	1.6
実施例 8	1.565, 1.570, 1.575 1.580, 1.585, 1.590 1.595, 1.600	-35	ファイバ 3	40	0.2×10^3	0.97 μm 帯 (前方向励起)	27	1.8

【0124】

【表3】

【0125】

【表4】

	WDM波長 (nm)	入射信号光量 (dBm/dB)	ファイバ種類	ファイバ長(m)	ファイバ長(m)×色散加 速度(W/pm)	励起系	WDM波長の 平均値(dB)	利得増益(dB)
実施例9	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-35	ファイバ1	200	2×10^3	後方: 0.98 μ m帯 後方: 1.48 μ m帯 (双方向励起系)	28	1.8
実施例10	1565,1570,1575,1580, 1585,1590,1595,1600	-30	ファイバ3	40	0.4×10^3	後方: 0.98 μ m帯 後方: 1.48 μ m帯 (双方向励起系)	16	1.8
実施例11	1565,1570,1575,1580, 1585,1590,1595,1600	-35	ファイバ4	40	0.2×10^3	後方: 0.98 μ m帯 後方: 1.48 μ m帯 (双方向励起系)	21	1.6

	WDM波長(μm)	入射信号光量 (dBm/dB)	ファイバ種類	ファイバ径(μm)	ファイバ長(μm) 速度(wppm)	増起系	WDM信号の 平均利得(dB)	利得偏差(dB)
実施例12	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-35	ファイバ6	4	0.4×10^5	1.48 μm帯 (双方向増起系)	25	1.8
実施例13	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-30	ファイバ6	2	0.2×10^5	0.98 μm帯 (前方向増起系)	21	1.8
実施例14	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-35	ファイバ7	4	0.4×10^5	1.48 μm帯 (双方向増起系)	18	1.6
実施例15	1570,1576,1580,1584, 1588,1592,1600	-20	ファイバ8	10	0.33×10^5	1.48 μm帯 (双方向増起系)	22	1.5
実施例16	1565,1570,1575,1580, 1585,1590,1595,1600	-40	ファイバ9	4	0.04×10^5	0.98 μm帯 (双方向増起系)	18	1.8
実施例17	1565,1570,1575,1580, 1585,1590,1595,1600	-35	ファイバ9	5	0.05×10^5	1.48 μm帯 (双方向増起系)	26	1.9
実施例18	1565,1570,1575,1580, 1585,1590,1595,1600	-35	ファイバ9	3.5	0.035×10^5	後方: 0.98 μm帯 前方: 1.48 μm帯 (双方向増起系)	22	1.6
実施例19	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-35	ファイバ10	10	0.2×10^5	後方: 0.98 μm帯 前方: 1.48 μm帯 (双方向増起系)	22	1.8
実施例20	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-40	ファイバ10	10	0.2×10^5	1.48 μm帯 (双方向増起系)	21	1.9
実施例21	1570,1574,1578,1582, 1586,1590,1594,1600	-40	ファイバ10	20	0.4×10^5	0.98 μm帯 (前方向増起系)	26	1.6

【0126】表1～表4に示すように、Er添加石英系ファイバを用いた光ファイバ増幅器では、1.57～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、Er添加フッ化物系ファイバを用いた光ファイバ増幅器では、1.565～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、Er添加酸化物多成分ガラスファイバ(Er添加アルミノ珪酸塩ガラスファイバ、Er添加リン酸塩ガラスファイバ)では、1.57～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、Er添加フッリン酸ガ

ラスファイバでは、1.57～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、Er添加カルコゲナイドガラスファイバでは、1.57～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、Er添加テルライトガラスファイバでは、1.565～1.60 μmの波長域にあるWDM信号について、信号利得が15 dB以上でかつ利得偏差が2 dB以内の実用レベルを実現することができる。すなわち、本発明の1.58 μm帯光ファイバ増幅器では、その波長域のWDM信号を平坦に増幅すること

ができる。

【0127】以上の実施例では、励起光源として半導体レーザを用いた例を示したが、チタンサファイヤレーザ、F-センタレーザの個体レーザ、Yb添加ファイバレーザ、Tm添加ファイバレーザを使用しても同様の効果が得られた。また、Er添加フッ化物系ファイバのガラス組成として、他のZr系、Ln系、GaF₃/LnF₃系フッ化物ガラスを用いてもよい。

【0128】実施例22

図22の光増幅部10Aを構成する各部の具体例を示す。Er添加光ファイバ5には、Er添加フッ化物ガラスファイバを用いる。そのガラス組成はZr系フッ化物ガラス(ZrF₄-BaF₂-LaF₃-YF₃-AlF₃-LiF-NaF)であり、特性はファイバ長5m、比屈折率差2.5%、カットオフ波長1.0μm、Er添加濃度1000wt. ppmとする。励起光源15A、15Bには、1480nm帯半導体レーザを用いる。合波器16A、16Bには、バルク型WDMカップラを用いる。光アイソレータ17A、17Bには、偏波無依存型の1550nm帯光アイソレータを用いる。

【0129】図22の光増幅器10Bを構成する各部の具体例を示す。Er添加光ファイバ5には、Er添加石英系ファイバを用いる。その特性はファイバ長200m、比屈折率差1%、カットオフ波長1.1μm、Al添加濃度4.2wt. ppm、Er添加濃度1310wt. ppmとする。励起光源15A、15Bには、1480nm帯半導体レーザを用いる。合波器16A、16Bには、バルク型WDMカップラを用いる。光アイソレータ17A、17Bには、偏波無依存型の1580nm帯光アイソレータを用いる。

【0130】図28は、図26の評価系で測定された実施例22の光増幅器の増幅特性を示す。ただし、波長可変光源20A~20Pの信号波長は、それぞれ、1532、1536、1540、1544、1548、1552、1556、1560、1572、1576、1580、1584、1588、1592、1596、1660nmである。また、信号光入力強度は、各チャネル当たり-25dBmとした。ここに示すように、1532~1560nmおよび1572~1600nmに配置したWDM信号は、平均利得25dB（増幅前の信号光強度-25dBm/chに対して、増幅後の信号光強度が平均-0dBm/ch）、利得偏差1.5dB以内で光増幅できた。

【0131】このように、本発明の光増幅器を用いることにより広い波長帯域に渡って平坦な増幅特性が得られ、その増幅波長帯域を従来の1530~1560nm

(30nm)から、1530~1560nmおよび1570~1600nm（合計60nm）に2倍に拡大できることが分かった。すなわち、本発明の光増幅器をWDMシステムに適用した場合には、伝送容量を従来のシステムの2倍にすることができる。

【0132】実施例23

本実施形態の光増幅器の基本構成は、図22および図23に示す実施例22と同様である。ただし、本実施例では、図22の光増幅部10Bを構成するEr添加光ファイバ14として、Er添加多成分酸化物系ファイバを用いる。その特性は、ファイバ長3m、比屈折率差0.7%、カットオフ波長1.1μm、Er添加濃度1000wt. ppmとする。また、分波部2および合波部4は、誘電体多層膜を用いたバルク型合分波器を用いる。誘電体多層膜を用いたバルク型合分波器は、例えば16波のWDM信号を8波ずつの2群に挙に分波し、8波ずつの2群のWDM信号を16波に挙に合波することができる。その他の具体的構成は、実施例22と同様である。

【0133】図29は、図26の評価系で測定された実施例23の光増幅器の増幅特性を示す。ただし、信号光入力強度は、各チャネル当たり-20dBmとした。ここに示すように、1532~1560nmおよび1572~1600nmに配置したWDM信号は、平均利得20dB（増幅前の信号光強度-20dBm/chに対して、増幅後の信号光強度が平均-0dBm/ch）、利得偏差1.5dB以内で光増幅できた。

【0134】このように、本発明の光増幅器を用いることにより広い波長帯域に渡って平均な増幅特性が得られ、その増幅波長帯域を従来の1530~1560nm(30nm)から、1530~1560nmおよび1570~1600nm（合計60nm）に2倍に拡大できることが分かった。

【0135】実施例24

本実施例の光増幅器の基本構成は、実施例22または実施例23と同様である。ここでは、図22の光増幅部10A、10Bを構成するEr添加光ファイバ5の特性を変えたものを示す。

【0136】表5には、光増幅部10Aを構成するEr添加光ファイバ5を5種類(A, B, C, D, E)示す。表6には、光増幅部10Bを構成するEr添加光ファイバ5を8種類(F, G, H, I, J, K, L, M)示す。

【0137】

【表5】

実施例 24 における光増幅部 10A

	組 成	ファイ バ長 (m)	比屈折 率差 (%)	カット 波長 (μ m)	Er 添加濃度 (wt. ppm)
A	Er 添加フッ化物ガラスファイバ ガラス組成: Zr 系フッ化物ガラス (ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - YF_3 - AlF_3 - LiF - NaF)	7	2.5	1.0	1000
B	Er 添加フッ化物ガラスファイバ ガラス組成: In 系フッ化物ガラス (InF_3 - GaF_3 - ZnF_2 - BaF_2 - PbF_2 - SrF_2 - YF_3 - LiF - NaF)	7	2.5	1.0	1000
C	Er 添加フッリン酸ガラスファイバ ガラス組成: P_2O_5 - Al_2O_3 - AlF_3 - LiF - MgF_2 - CaF_2 - SrF_2 - BaF_2 - LaF_3	0.8	0.29	1.0	3300
D	Er 添加テルライドガラスファイバ	1	2.5	1.3	1000
E	Er 添加カルコゲナイドガラスファイバ	3	3.7	1.1	2000

【0138】

【表6】

実施例 24 における光増幅部 10A

(第4の実施形態における光増幅部 1-3)

	組 成	ファイ バ長 (m)	比屈折 率差 (%)	カット 波長 (μ m)	Er 添加濃度 (wt. ppm)
F	Er 添加石英系ファイバ (Al 添加濃度: 4.2 wt.%)	200	2.5	1.1	1310
G	Er 添加多成分酸化物系ガラスファイバ ガラス組成: アルミノ珪酸塩ガラス	3	0.7	1.1	10000
H	Er 添加多成分酸化物系ガラスファイバ ガラス組成: リン酸塩ガラス	5	0.7	1.27	10000
I	Er 添加フッ化物ガラスファイバ ガラス組成: Zr 系フッ化物ガラス (ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - YF_3 - AlF_3 - LiF - NaF)	40	2.5	1.0	1000
J	Er 添加フッ化物ガラスファイバ ガラス組成: In 系フッ化物ガラス (InF_3 - GaF_3 - ZnF_2 - BaF_2 - PbF_2 - SrF_2 - YF_3 - LiF - NaF)	40	2.5	1.0	1000
K	Er 添加フッリン酸ガラスファイバ ガラス組成: P_2O_5 - Al_2O_3 - AlF_3 - LiF - MgF_2 - CaF_2 - SrF_2 - BaF_2 - LaF_3	3	0.29	1.0	3300
L	Er 添加テルライドガラスファイバ	5	2.5	1.3	1000
M	Er 添加カルコゲナイドガラスファイバ	10	3.7	1.1	2000

【0139】表7～表9は、光増幅部 10A と光増幅部 10B の組み合わせによる光増幅器の増幅特性を示す。ここに示すように、すべての組み合わせ (40通り) に

おいて、従来の光ファイバ増幅器の増幅波長帯域を2倍以上に拡大できることが分かった。なお、ここでは光増幅部 10A、10B の励起波長を 1480 nm とした

が、すべてまたは一部を980nmとしても同様の増幅特性が得られた。 【0140】

【表7】
実施例24の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
A	F	1530~1560 1570~1600	25	1.5
	G	1530~1560 1570~1600	20	1.5
	H	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	I	1530~1560 1565~1600	25	1.5
	J	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	K	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	L	1530~1560 1565~1600	20	1.5
	M	1530~1560 1570~1600	15	1.5

【0141】

【表8】
実施例24の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
B	F	1530~1560 1570~1600	18	1.5
	G	1530~1560 1570~1600	18	1.5
	H	1530~1560 1570~1600	18	1.5
	I	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	J	1530~1560 1565~1595	18	1.5
	K	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	L	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	M	1530~1560 1570~1600	15	1.5

【0142】

【表9】

実施例24の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
C	F	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	G	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	H	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	I	1530~1560 1565~1600	15	1.5
	J	1530~1560 1565~1600	15	1.5
	K	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	L	1530~1560 1565~1600	15	1.5
	M	1530~1560 1570~1600	15	1.5

【0143】

【表10】

実施例24の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
D	F	1530~1560 1570~1600	20	1.5
	G	1530~1560 1570~1600	20	1.5
	H	1530~1560 1570~1600	20	1.5
	I	1530~1560 1565~1600	20	1.5
	J	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	K	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	L	1530~1560 1565~1600	20	1.5
	M	1530~1560 1570~1600	15	1.5

【0144】

【表11】

実施例24の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
E	F	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	G	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	H	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	I	1530~1560 1565~1600	15	1.5
	J	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	K	1530~1560 1570~1600	15	1.5
	L	1530~1560 1565~1600	18	1.5
	M	1530~1560 1570~1600	18	1.5

【0145】実施例25

本実施例の光増幅器の基本構成は、実施例22または実施例23と同様である。ただし、本実施例では3つの光増幅部10A、10B、10Cを有する構成とし、光増幅部10A、10B、10Cを構成するEr添加光ファイバ14の特性を変えたものを示す。

【0146】表12には、光増幅部10Aを構成するE

r添加光ファイバ5を1種類(N)示す。表13には、光増幅部10Bを構成するEr添加光ファイバ5を2種類(O、P)示す。光増幅部10Cを構成するEr添加光ファイバ5は、表6に示す8種類(F、G、H、I、J、K、L、M)を用いる。

【0147】

【表12】

実施例25における光増幅部10A

	組 成	ファイ バ長 (m)	比屈折 率差 (%)	カット 波長 (μ m)	Er 添加濃度 (wt. ppm)
N	Er添加石英系ファイバ (Al添加濃度: 4.2 wt.%)	20	1.8	1.1	1310

【0148】

【表13】

実施例25における光増幅部10B

	組 成	ファイ バ長 (m)	比屈折 率差 (%)	カット 波長 (μ m)	Er 添加濃度 (wt. ppm)
O	Er添加多成分酸化物系ファイバ ガラス組成: アルミノ硅酸塩ガラス	80	0.7	1.1	10000
P	Er添加多成分酸化物系ファイバ ガラス組成: リン酸塩ガラス	1	0.7	1.27	10000

【0149】表14~表15は、光増幅部10A、10B、10Cの組み合わせによる光増幅器の増幅特性を示す。ここに示すように、すべての組み合わせ(16通り)において、従来の光ファイバ増幅器の増幅波長帯域を大幅に改善できることが分かった。なお、ここでは光

増幅部10A、10B、10Cの励起波長を1480nmとしたが、すべてまたは一部を980nmとしても同様の増幅特性が得られた。

【0150】

【表14】

実施例 25 の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	光増幅部 10C	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
N	O	F	1530~1540 1545~1560 1570~1600	20	1.5
		G	1530~1540 1545~1560 1570~1600	20	1.5
		H	1530~1540 1545~1560 1575~1600	22	1.5
		I	1530~1540 1545~1560 1565~1600	20	1.5
		J	1530~1540 1545~1560 1565~1600	18	1.5
		K	1530~1540 1545~1560 1570~1600	15	1.5
		L	1530~1540 1545~1560 1570~1600	20	1.5
		M	1530~1540 1545~1560 1570~1600	15	1.5

【0151】

【表 15】

実施例 25 の光増幅器の増幅特性

光増幅部 10A	光増幅部 10B	光増幅部 10C	増幅波長帯域 (nm)	平均利得 (dB)	利得偏差 (dB)
N	P	F	1530~1540 1545~1560 1570~1600	22	1.5
		G	1530~1540 1545~1560 1570~1600	20	1.5
		H	1530~1540 1545~1560 1575~1600	22	1.5
		I	1530~1540 1545~1560 1565~1600	22	1.5
		J	1530~1540 1545~1560 1565~1600	22	1.5
		K	1530~1540 1545~1560 1570~1600	15	1.5
		L	1530~1540 1545~1560 1570~1600	20	1.5
		M	1530~1540 1545~1560 1570~1600	15	1.5

【0152】 実施例 26

図 30 (a) ~ (h) は、図 27 の光増幅部 30A ~ 30H の具体的な構成例を 40A ~ 40H として示す。

【0153】 図において、増幅媒体としての Er 添加光

ファイバ 14 には、Er 添加石英系ファイバを用いる。
その特性は、ファイバ長 20m (光増幅部 40A ~ 40D) および 200m (光増幅部 40E ~ 40F)、比屈折率差 1%、カットオフ波長 1.1 μ m、Al 添加濃度

4. 2 wt. %, Er 添加濃度 1310 wt. ppm とする。合波器 16A, 16B は、バルク型 WDM カプラを用い、信号光と励起光を合波して Er 添加光ファイバ 14 に入射する。なお、ここでは双方向励起の構成例を示すが、Er 添加光ファイバ 14 の一方のみから励起光を入射する前方励起または後方励起の構成をとってもよい。

【0154】増幅部以外の構成は図 27 と同様である。ただし、本実施例においては、励起光源 32A, 32B には、1480 nm 帯半導体レーザを用いる。励起光を分岐する分岐器 33A, 33B には、プレーナ導波路型 1×8 光分岐回路を用いる。分岐部 31 および合波部 35 には、アレイ導波路回折格子を用いる。光可変減衰器 34A~34B には、バルク型減衰量可変光アッテネータを用いる。光アイソレータ 36A, 36B には、1550 nm およびおよび 1580 nm 帯で 60 dB 程度の逆方向挿入損が得られる偏波無依存型ものを用いる。

【0155】図 31 は、図 26 の評価系で測定された第 5 の実施形態の光増幅器の増幅特性を示す。ただし、信号光入力強度は、各チャネル当たり -30 dBm とした。ここに示すように、1532~1560 nm および 1572~1600 nm に配置した WDM 信号は、平均利得 30 dB (増幅前の信号光強度 -30 dBm/ch に対して、増幅後の信号光強度が平均 0 dBm/ch)、ほぼ等しい利得 (利得偏差 0 dB) で光増幅できた。

【0156】このように、本発明の光増幅器を用いることにより広い波長帯域に渡って平坦な増幅特性が得られ、その増幅波長帯域を従来の 1530~1560 nm (30 nm) から、1530~1560 nm および 1570~1600 nm (合計 60 nm) に 2 倍に拡大できることが分かった。なお、ここでは光増幅部 40A~40H の励起波長を 1480 nm としたが、すべてまたは一部を 980 nm としても同様の増幅特性が得られた。

【0157】実施例 27

本実施例の光増幅器の基本構成は、図 22 に示す実施例 22, 23 と同様に、2 つの増幅帯を並列増幅する構成である。ただし、本実施例では図 22 の増幅部 10A としては、図 32 に示す光イコライザ 37 を付加した光ファイバ増幅器を使用した。Er 添加ファイバとして、Er 添加石英系ファイバを用いた。ファイバ長 25 m、比屈折率差 1.7%、カットオフ波長 1.1 μ m、Er 添加濃度 1300 ppm である。励起光源 15A, 15B には 0.98 μ m 帯半導体レーザを用いた。合波器 16A, 16B には、バルク型 WDM カプラを用いた。光イコライザ 37 としては、長周期ファイバグレーティングを用いた。なお、光イコライザ 37 の透過特性は、図 32 の光ファイバ増幅器の特性が、1.53~1.56 μ m 帯に利得平坦特性を有するように作製したものをい

た。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は 38 dB である。また、図 22 の増幅部 10B としては、図 23 に示す構成の光ファイバ増幅器を使用した。Er 添加ファイバとして、Er 添加石英系ファイバを用いた。ファイバ長 200 m、比屈折率差 1.7%、カットオフ波長 1.1 μ m、Er 添加濃度 1300 ppm である。励起光源 15A, 15B には 1.48 μ m 帯半導体レーザを用いた。合波器 16A, 16B には、バルク型 WDM カプラを用いた。本光ファイバ増幅器は 1.57~1.60 μ m に利得平坦特性を有する。利得平坦域の信号利得は 30 dB である。分波部 11 および合波部 13 は、バルク型合成分波器を用いた。さらに、本実施例の光増幅器では、光可変減衰器 12A, 12B の損失量を調整して、光ファイバ増幅器 10A の 1.53~1.56 μ m 帯に利得平坦利得を 28 dB、光ファイバ増幅器 10B の 1.57~1.60 μ m 帯に利得平坦利得を 28 dB に調整した。

【0158】本実施例 27 の光増幅器の増幅特性は、図 26 の評価系で測定した。波長可変光源 20A~20P の信号波長は、それぞれ、1532、1536、1540、1544、1548、1552、1556、1560、1572、1576、1580、1584、1592、1596、1660 nm である。信号入射強度は、各チャネル当たり -35 dBm とした。本測定により、1532~1560 nm および 1572~1600 nm に配置した WDM 信号を平均利得 28 dB、利得偏差 1.5 dB 以内で増幅できた。

【0159】実施例 28

本実施例の光増幅器の基本構成は、図 22 に示す実施例 22, 23 と同様である。ただし、本実施例では、4 つの増幅部 10A, 10B, 10C, 10D を有する構成である。増幅部 10A としては、図 32 に示す光イコライザ 37 を付加した光ファイバ増幅器を使用した。Er 添加ファイバとして、Er 添加石英系ファイバを用いた。ファイバ長 25 m、比屈折率差 1.7%、カットオフ波長 1.1 μ m、Er 添加濃度 1300 ppm である。励起光源 15A, 15B には 0.98 μ m 帯半導体レーザを用いた。合波器 16A, 16B には、バルク型 WDM カプラを用いた。光イコライザ 37 としては、長周期ファイバグレーティングを用いた。なお、光イコライザ 37 の透過特性は、図 32 の光ファイバ増幅器の特性が、1.53~1.56 μ m 帯に利得平坦特性を有するように作製したものをい

は、バルク型WDMカブラを用いた。本光ファイバ増幅器は1.57~1.60 μm に利得平坦特性を有する。利得平坦域の信号利得は30dBである。増幅部10Cとしては、図33に示す光イコライザ40を付加したTm³⁺添加光ファイバ増幅器を使用した。Tm添加ファイバとして、Tm添加フッ化物系ファイバ39を用いた。ファイバ長20m、比屈折率差2.5%、カットオフ波長1.0 μm 、Tm添加濃度1000ppmである。励起光源15A、15Bには1.047 μm 帯発振のNd-YLFレーザを用いた。合波器16A、16Bには、ファイバカブラを用いた。光イコライザ40としては、ファブリペローエタロンを用いて構成したものを使用した。なお、光イコライザ40の透過特性は、図33の光ファイバ増幅器の特性が、1.43~1.49 μm 帯に利得平坦特性を有するように作製したものを用いた。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は28dBである。増幅部10Dとしては、図34に示す光イコライザ40を付加したラマンファイバ増幅器を使用した。ラマン増幅用のファイバとして、石英系ファイバ41を用いた。ファイバ長60km、比屈折率差0.7%、カットオフ波長0.9 μm である。励起光源38には1.43 μm 帯発振のラマンレーザを用いた。合波器16A、16Bには、ファイバカブラを用いた。光イコライザ42としては、ファブリペローエタロンを用いて構成したものを使用した。なお、光イコライザ42の透過特性は、図34のラマンファイバ増幅器の特性が、1.49~1.52 μm 帯に利得平坦特性を有するように作製したものを用いた。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は18dBである。分波部11および合波部13は、図34に示すバルク型合分波器を用いた。ファイバ46は信号域1.56~1.60の信号光を、ファイバ47は信号域1.53~1.56の信号光を、ファイバ48は信号域1.49~1.52の信号光を、ファイバ49は信号域1.43~1.49の信号光を出力するポートであり、ファイバ50に合波した信号光あるいは分波する信号光用のポートである。また、45は1.49 μm 以上の信号光を透過し、1.48 μm 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜、44は1.52 μm 以上の信号光を透過し、1.52 μm 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜、43は1.56 μm 以上の信号光を透過し、1.56 μm 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜である。さらに、本実施例の光増幅器では、光可変減衰器12A、12B、12C、12Dの損失量を調整して、増幅部10A、10B、10C、10Dの利得平坦利得を18dBに調整した。

【0160】本実施例28の光増幅器の増幅特性は、図26の評価系の信号数を26波に増加して測定した。信号波長は、1430、1440、1450、1460、1470、1480、1490、1500、1510、1520、1532、1536、1540、1544、

1548、1552、1556、1560、1572、1576、1580、1584、1588、1592、1596、1660nmである。信号入射強度は、各チャンネル当たり-35dBmとした。本測定により、WDM信号を平均利得18dB、利得偏差1.5dB以内で増幅できた。

【0161】実施例29

本実施例の光増幅器の基本構成は、図22に示す実施例22、23と同様である。ただし、本実施例では、図35に示すように、4つの増幅部10A、10B、10C、10Dを有する構成である。増幅部10Aとしては、図32に示す光イコライザ37を付加した光ファイバ増幅器を使用した。Er添加ファイバとして、Er添加石英系ファイバを用いた。ファイバ長25m、比屈折率差1.7%、カットオフ波長1.1 μm 、Er添加濃度1300ppmである。励起光源15A、15Bには0.98 μm 帯半導体レーザを用いた。合波器16A、16Bには、バルク型WDMカブラを用いた。光イコライザ37としては、長周期ファイバグレーティングを用いた。なお、光イコライザ37の透過特性は、図32の光ファイバ増幅器の特性が、1.53~1.56 μm 帯に利得平坦特性を有するように作製したものを用いた。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は38dBである。増幅部10Bとしては、図23に示す構成の光ファイバ増幅器を示した。Er添加ファイバとして、Er添加石英系ファイバを用いた。ファイバ長200m、比屈折率差1.7%、カットオフ波長1.1 μm 、Er添加濃度1300ppmである。励起光源15A、15Bには1.48 μm 帯半導体レーザを用いた。合波器16A、16Bには、バルク型WDMカブラを用いた。本光ファイバ増幅器は1.57~1.60 μm に利得平坦特性を有する。利得平坦域の信号利得は30dBである。増幅部10Cとしては、図33に示す光イコライザ40を付加したPr³⁺添加光ファイバ増幅器を使用した。Pr添加ファイバとして、Pr添加フッ化物系ファイバ39を用いた。ファイバ長20m、比屈折率差2.5%、カットオフ波長1.0 μm 、Pr添加濃度1000ppmである。励起光源15A、15Bには1.047 μm 帯発振のNd-YLFレーザを用いた。合波器16A、16Bには、ファイバカブラを用いた。光イコライザ40としては、ファブリペローエタロンを用いて構成したものを使用した。なお、光イコライザ40の透過特性は、図33の光ファイバ増幅器の特性が1.28~1.32 μm 帯に利得平坦特性を有するように作製したものを用いた。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は28dBである。増幅部10Dとしては、図34に示す光イコライザ40を付加したラマンファイバ増幅器を使用した。ラマン増幅用のファイバとして、石英系ファイバ41を用いた。ファイバ長60km、比屈折率差0.7%、カットオフ波長0.9 μm である。励起光

源38には、 $1.43\mu\text{m}$ 帯発振のラマンレーザを用いた。合波器16A、16Bには、ファイバカプラを用いた。光イコライザ42としては、ファブリペローエタロンを用いて構成したものを使用した。なお、光イコライザ42の透過特性は、図34のラマンファイバ増幅器の特性が、 $1.49\sim 1.52\mu\text{m}$ 帯に利得平坦特性を有するように作製したものを用いた。本光ファイバ増幅器の利得平坦域の信号利得は18dBである。分波部11および合波部13は、図34に示すバルク型合分波器を用いた。ファイバ46は信号域 $1.56\sim 1.60$ の信号光を、ファイバ47は信号域 $1.53\sim 1.56$ の信号光を、ファイバ48は信号域 $1.49\sim 1.52$ の信号光を、ファイバ49は信号域 $1.28\sim 1.32$ の信号光を入出力するポートであり、ファイバ50に合波した信号光あるいは分波する信号光用のポートである。また、45は $1.49\mu\text{m}$ 以上の信号光を透過し、 $1.48\mu\text{m}$ 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜、44は $1.52\mu\text{m}$ 以上の信号光を透過し、 $1.52\mu\text{m}$ 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜、43は $1.56\mu\text{m}$ 以上の信号光を透過し、 $1.56\mu\text{m}$ 帯以下の信号光を反射する誘電体多層膜である。さらに、本実施例の光増幅器では、光可変減衰器12A、12B、12C、12Dの損失量を調整して、増幅部10A、10B、10C、10Dの利得平坦利得を18dBに調整した。

【0162】本実施例28の光増幅器の増幅特性は、図26の評価系の信号数を25波に増加して測定した。信号波長は、1280、1290、1300、1310、1320、1490、1500、1510、1520、1532、1536、1540、1544、1548、1552、1556、1560、1572、1576、1580、1584、1588、1592、1596、1660nmである。信号入射強度は、各チャンネル当たり -35dBm とした。本測定により、WDM信号を平均利得18dB、利得偏差1.5dB以内で増幅できた。

【0163】

【発明の効果】上述のように、本発明によれば、コア部またはクラッド部の少なくとも一方にエルビウムを添加したエルビウム添加ファイバと、前記光ファイバを励起する励起光源と、前記励起光源からの励起光と信号光を前記Er添加ファイバに入射する光学手段と、光アイソレータとを備えた光増幅器において、前記エルビウム添加ファイバとして、ファイバ長(m)とエルビウム添加濃度(重量ppm)との積である等価的ファイバ長が、該エルビウム添加ファイバの励起に用いる前記励起光源の波長において得られる信号利得が所定の実用基準値以上の信号利得となる長さである $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバを用いたことにより、広帯域化および利得平坦化が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来の光増幅器の増幅特性を示すグラフである。

【図2】Er添加石英系ファイバを用いた従来の光ファイバ増幅器における $1.58\mu\text{m}$ 帯の増幅帯域を示すグラフである。

【図3】本発明の $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の基本構成(前方励起系)を示すブロック図である。

【図4】本発明の $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の基本構成(後方励起系)を示すブロック図である。

【図5】本発明の $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器の基本構成(双方向励起系)を示すブロック図である。

【図6】Er添加石英系ファイバの励起光強度に対する増幅帯域の変化の一例を示すグラフである。

【図7】Er添加石英系ファイバのファイバ長に対する増幅帯域の変化の一例を示すグラフである。

【図8】Er添加石英系ファイバを $0.98\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図9】Er添加石英系ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図10】Er添加フッ化物ファイバを $0.97\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図11】Er添加フッ化物ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図12】Er添加テルライトガラス系ファイバを $0.98\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図13】Er添加テルライトガラス系ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図14】Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバを $0.98\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図15】Er添加酸化物多成分ガラス系ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図16】Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバを $0.98\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図17】Er添加カルコゲナイドガラス系ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図18】Er添加フツリン酸ガラス系ファイバを $0.98\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

【図19】Er添加フツリン酸ガラス系ファイバを $1.48\mu\text{m}$ 帯励起した場合の信号利得と〔ファイバ長×Er添加濃度〕の関係を示すグラフである。

Er添加濃度]の関係を示すグラフである。

【図20】Er添加石英系ファイバを用いた1.58 μ m帯光ファイバ増幅器における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得を示すグラフである。

【図21】Er添加フッ化物ファイバを用いた1.58 μ m帯光ファイバ増幅器における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得を示すグラフである。

【図22】本発明の一実施形態による光増幅器を示すブロック図である。

【図23】図10の光増幅器の光増幅部10A、10Bの構成例を示すブロック図である。

【図24】図10の光増幅器の分波部および合成部の構成例を示すブロック図である。

【図25】図10の光増幅器の分波部および合波部として使用されるバルク型合分波器の構成を示すブロック図である。

【図26】本発明の光増幅器の増幅特性を測定する評価系の構成を示すブロック図である。

【図27】本発明の一実施形態による光増幅器を示すブロック図である。

【図28】本発明の実施例22による光増幅器の増幅特性を示すグラフである。

【図29】本発明の実施例23による光増幅器を示すグラフである。

【図30】図27の光増幅器の光増幅部の具体的構成例を示すブロック図であり、(a)～(h)はそれぞれ光増幅部30A～30Hに対応する。

【図31】本発明の一実施形態による光増幅器を示すグラフである。

【図32】図10の光増幅部として使用される光イコライザを付加した光ファイバ増幅器の構成例を示すブロック図である。

【図33】図10の光増幅部として使用される光イコライザを付加したTm³⁺添加あるいはPr³⁺添加光ファイバ増幅器の構成例を示すブロック図である。

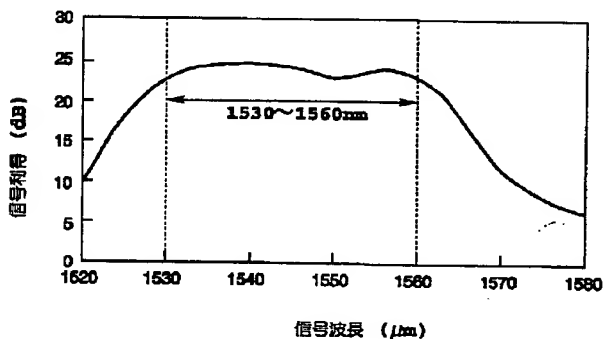
【図34】図10の光増幅部として使用される光イコライザを付加したラマンファイバ増幅器の構成例を示すブロック図である。

【図35】図10の4つの光増幅器の分波部および合成部として使用されるバルク型合分波器の構成を示すブロック図である。

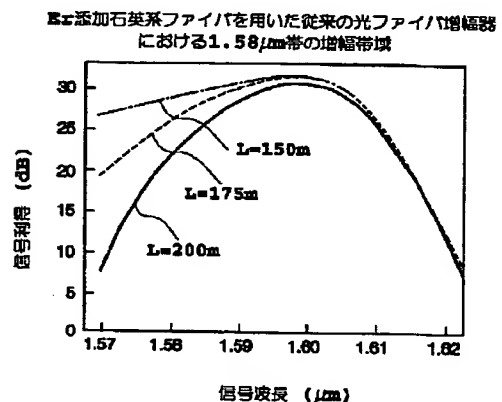
【符号の説明】

- 1 Er添加光ファイバ
- 2A, 2B 励起光源
- 3A, 3B 合波器
- 4A, 4B 光アイソレータ
- 10A, 10B, 10C 光増幅部
- 11 分波部
- 12A, 12B (バルク型減衰量可変) 光アッテネータ
- 13 合波部
- 14 Er添加光ファイバ
- 15A, 15B 励起光源
- 16A, 16B 合波器
- 17A, 17B 光アイソレータ
- 18A, 18B, 18C, 18D, 18E, 18F アレイ導波路回折格子
- 20A, 20B 波長可変光源
- 21 合波器
- 22 光アッテネータ
- 23 光増幅器
- 30A～30H 光増幅部
- 31 分波部
- 32A, 32B 励起光源
- 33A, 33B 分岐器
- 34A～34H 光可変減衰器
- 35 合波部
- 36A, 36B 光アイソレータ
- 40A～40H 光増幅部

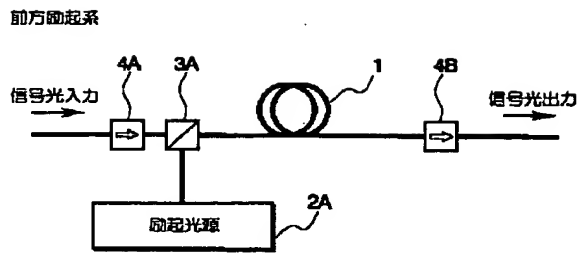
【図1】



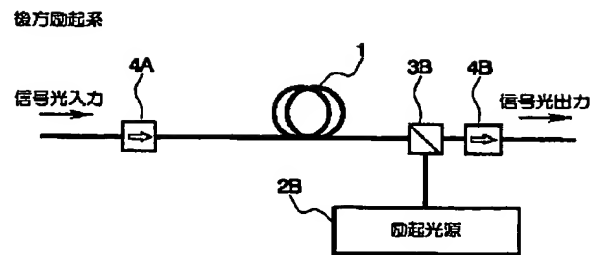
【図2】



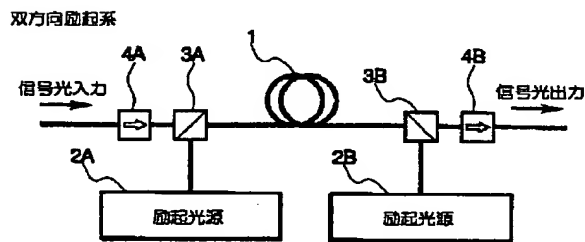
【図3】



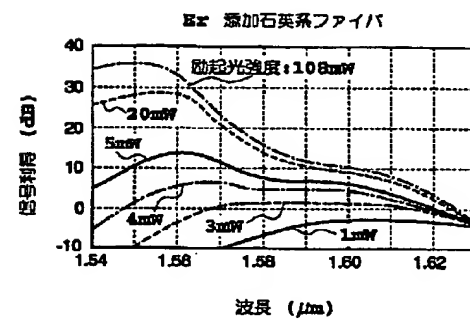
【図4】



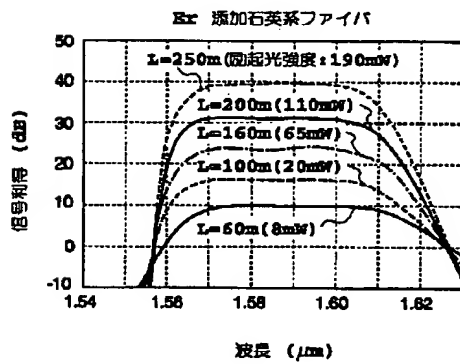
【図5】



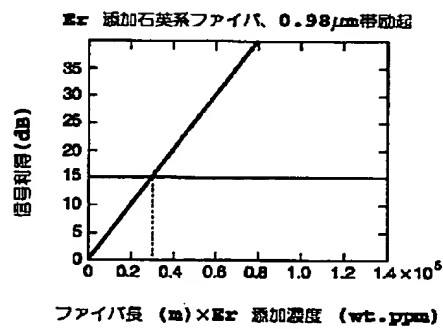
【図6】



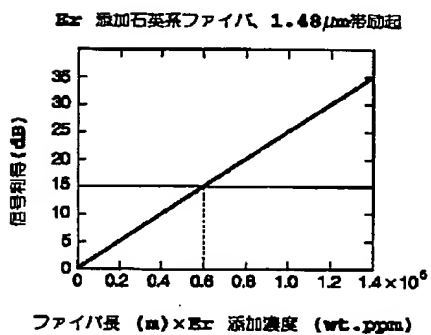
【図7】



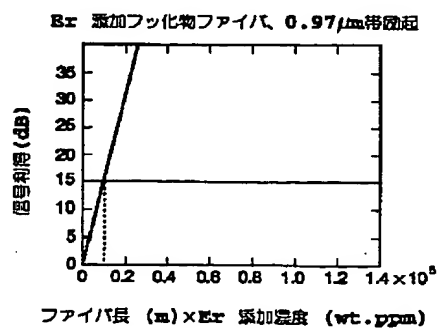
【図8】



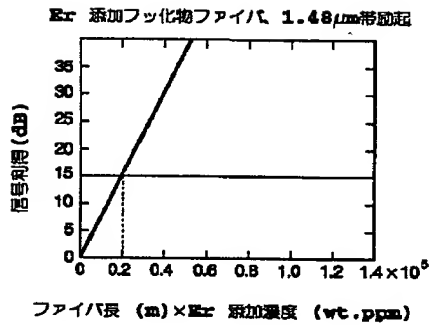
【図9】



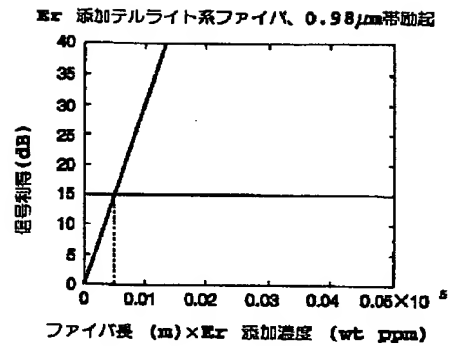
【図10】



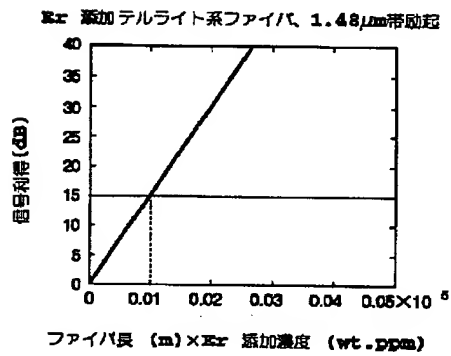
【図11】



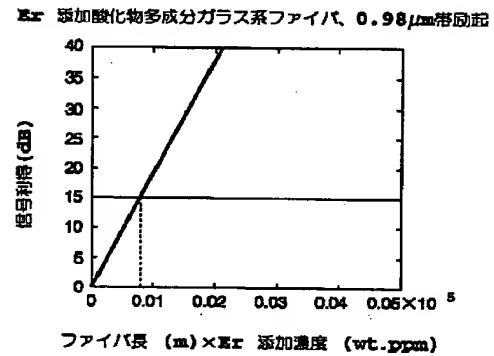
【図12】



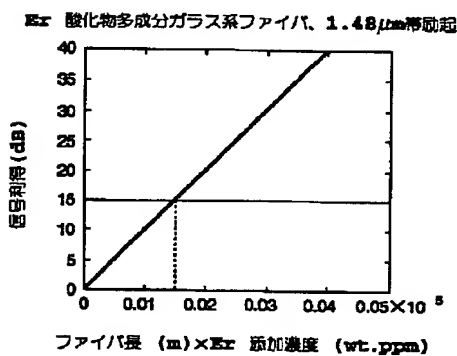
【図13】



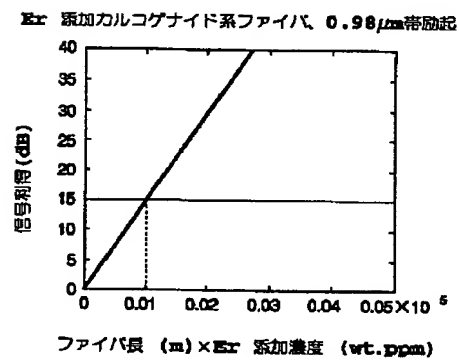
【図14】



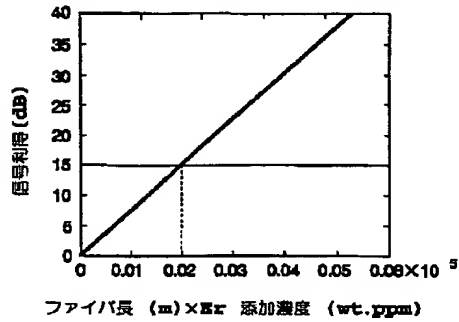
【図15】



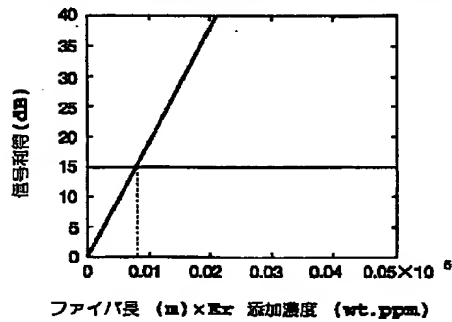
【図16】



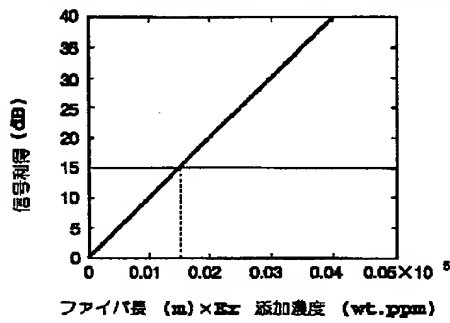
【図17】

Ex 添加カルコゲナイド系ファイバ、 $1.48\mu\text{m}$ 帯励起

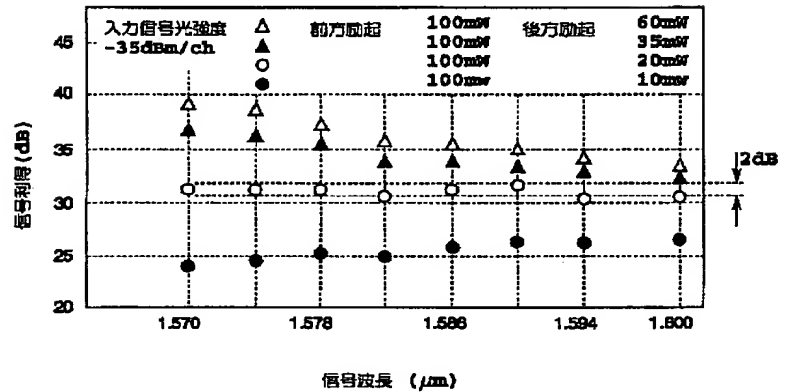
【図18】

Ex 添加フッリン酸ガラス系ファイバ、 $0.98\mu\text{m}$ 帯励起

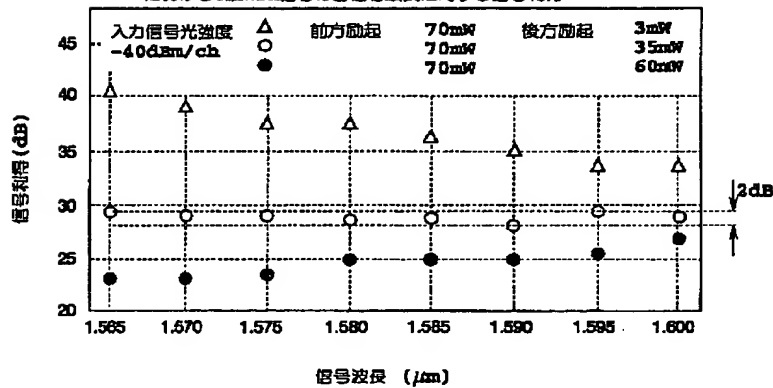
【図19】

Ex 添加フッリン酸ガラス系ファイバ、 $1.48\mu\text{m}$ 帯励起

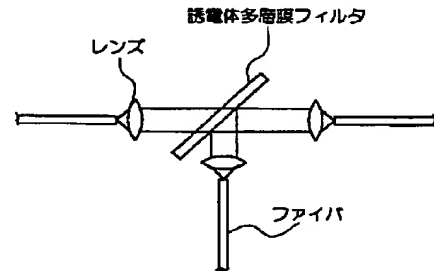
【図20】

Ex 添加石英系ファイバを用いた $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器
における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得

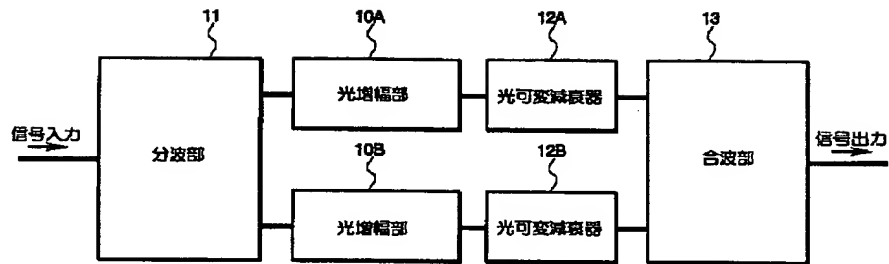
【図21】

Ex 添加フッ化物ファイバを用いた $1.58\mu\text{m}$ 帯光ファイバ増幅器
における8波WDM信号の各信号波長に対する信号利得

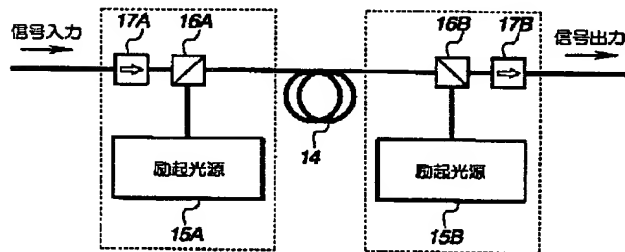
【図25】



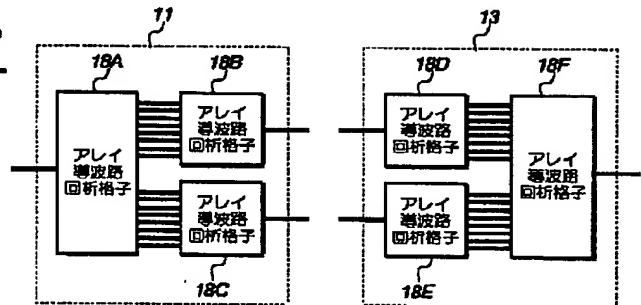
【図22】



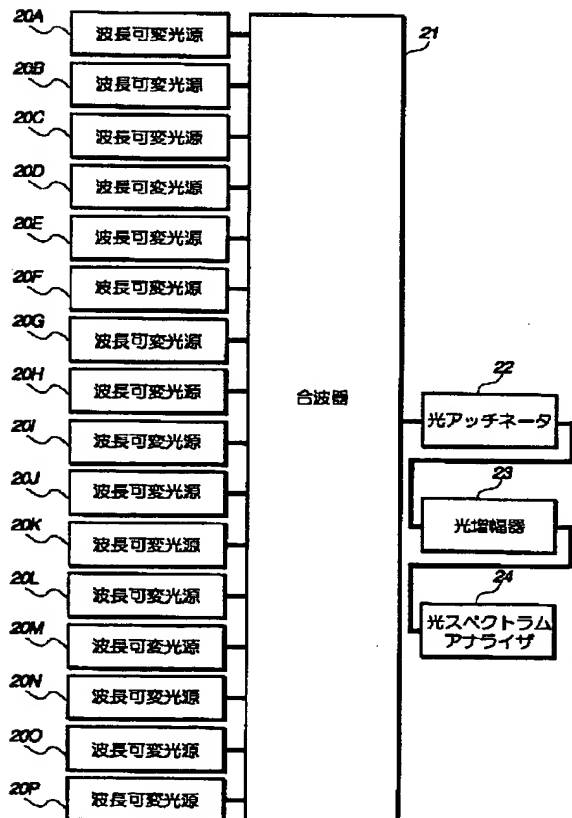
【図23】



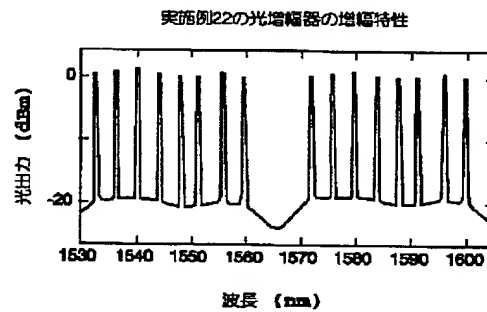
【図24】



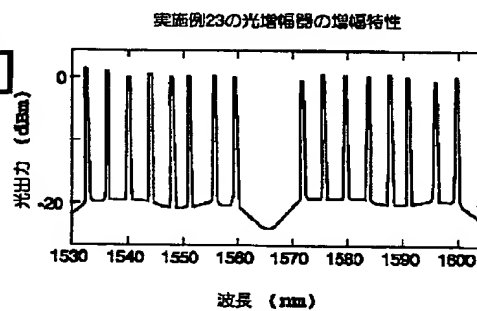
【図26】



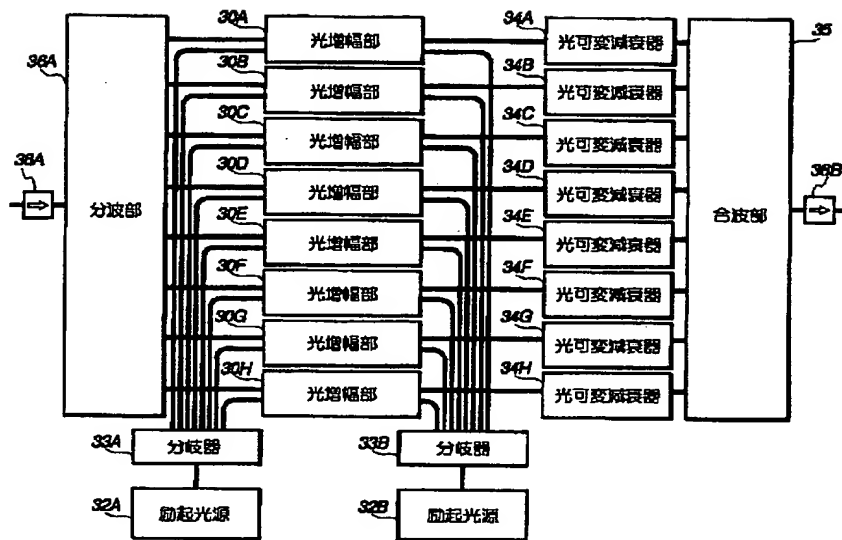
【図28】



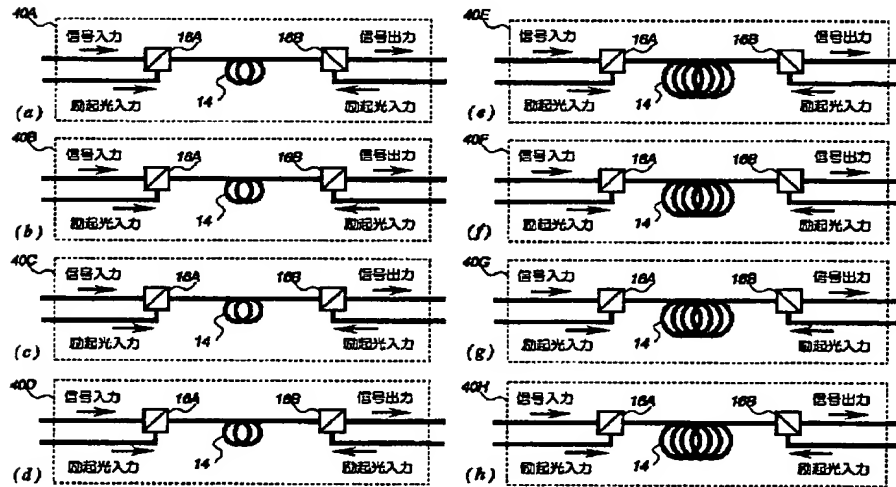
【図29】



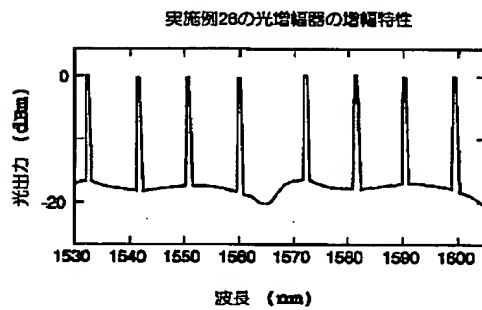
【図27】



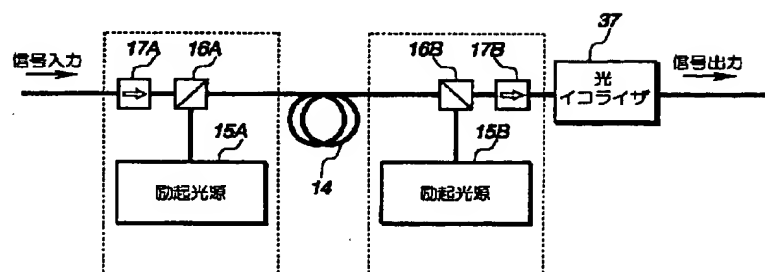
【図30】



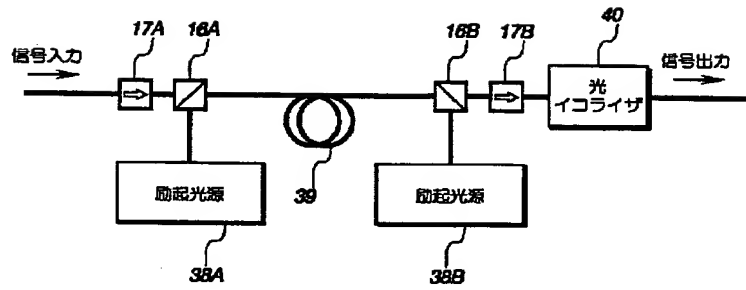
【図31】



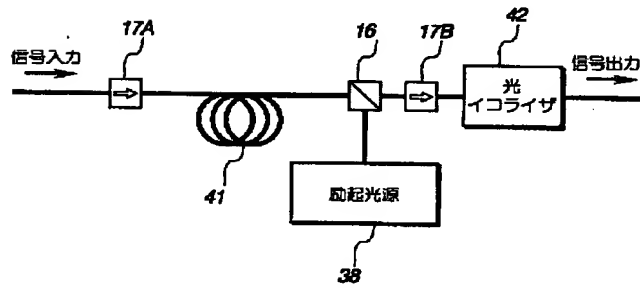
【図32】



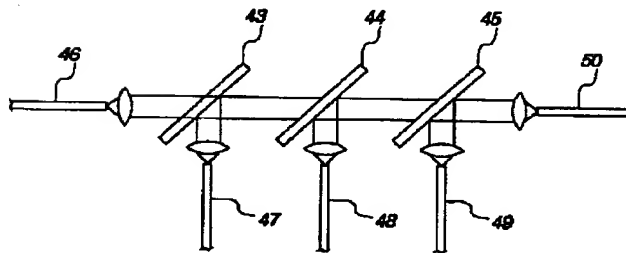
【図33】



【図34】



【図35】



フロントページの続き

(72) 発明者 大石 泰丈
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号 日本
電信電話株式会社内